

На правах рукописи



Абраменко Денис Сергеевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ  
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2010

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале)  
государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Хмелев Владимир Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Седалищев Виктор Николаевич**

кандидат технических наук  
**Первухин Борис Семенович**

Ведущая организация: ОАО «ФНПЦ «Алтай»

Защита состоится «3» февраля 2011 года в 9:30 на заседании  
диссертационного совета Д 212.004.06, действующего при Алтайском  
государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу:  
656038, Российская Федерация, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,  
ауд. 127 гл. к.

E-mail: [krivobok@ab.ru](mailto:krivobok@ab.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Алтайского  
государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные  
гербовой печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря  
диссертационного совета, по указанному адресу: 656038, г. Барнаул,  
пр. Ленина, 46.

Автореферат разослан «24» декабря 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кривобоков Д.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Основным параметром, характеризующим энергетическое воздействие при реализации ультразвуковых (УЗ) технологий, является амплитуда колебаний излучающей поверхности пьезопреобразователей колебательных систем технологических аппаратов.

Ультразвуковые колебания высокой интенсивности позволяют ускорить традиционные и реализовать новые процессы в жидких, твердых и газообразных средах. Эффективность таких процессов обусловлена возникновением нелинейных явлений при распространении высокоамплитудных колебаний, вызывающих кавитационные процессы, радиационное давление, микро- и макропотоки, приводящие к разрывам механических и химических связей, увеличению поверхностей и скоростей взаимодействия, ускорению процессов массопереноса и теплопереноса. Особенно впечатляющие результаты достигнуты при реализации процессов в жидких средах. Схлопывающиеся кавитационные пузырьки обеспечивают ускорение практически всех физико-химических процессов в сотни и тысячи раз.

Однако из-за экстремального характера кавитационного воздействия в жидких средах необходимо не только устанавливать определенное значение амплитуды колебаний для инициирования процессов, но поддерживать оптимальное значение амплитуды при изменении параметров сред (плотность, вязкость) и влиянии дестабилизирующих факторов (изменение температуры сред и материалов пьезопреобразователя, демпфирующее действие среды и т.п.). При этом необходимо учитывать зависимость контролируемой амплитуды колебаний от электромеханических свойств пьезопреобразователя, согласованности с электронным генератором, длины рабочего инструмента и формы рабочего окончания (инструмента).

В связи с тем что оптимальное ультразвуковое воздействие обеспечивает максимальную производительность процесса и получение конечного продукта наилучшего качества, возникает необходимость в непрерывном контроле параметров ультразвукового воздействия (амплитуды колебаний). При этом контроль необходимо осуществлять в течение всего жизненного цикла УЗ технологического аппарата: первоначальной настройки, диагностики, профилактического обслуживания, ремонта и непрерывно в ходе реализации технологических процессов.

Большинство традиционных методов не пригодны для непрерывного контроля амплитуды колебаний излучающих поверхностей колебательных систем, работающих в жидких средах, поскольку основаны на использовании внешних датчиков, вносящих существенные искажения в формируемые поля излучения, подвергаемых кавитационному разрушению в неагрессивных жидкостях или физико-химическому разрушению в агрессивных средах. Дополнительные ограничения на использование традиционных методов контроля вносят особенности практической реализации УЗ технологий, обуславливающие необходимость контроля амплитуды в жидкостях при высоких давлениях или температурах, в жидкостях с аномально высоким затуханием ультразвука и при наличии абразивных составляющих.

В связи с этим возникает необходимость в разработке методов и средств (систем) контроля амплитуды колебаний излучающих поверхностей колебательных систем с пьезопреобразователями, пригодных для применения не только в ходе создания, настройки, диагностики и ремонта (при остановке технологических процессов) УЗ технологических аппаратов, но и осуществления непрерывного контроля в ходе реализации технологических процессов в любых условиях без внесения внешних датчиков.

Для практической реализации создаваемая система непрерывного контроля амплитуды должна быть интегрирована в состав УЗ технологических аппаратов.

**Целью работы** является создание как самостоятельных, так и интегрированных в УЗ технологические аппараты систем контроля амплитуды колебаний, обеспечивающих получение информации об абсолютном значении амплитуды колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрической колебательной системы с различными рабочими инструментами и пригодных для применения не только в ходе создания, настройки, диагностики и ремонта (при остановке технологических процессов), но и при реализации технологических процессов без внесения внешних датчиков.

#### **Задачи исследования.**

1. Разработка метода, обеспечивающего прямое измерение амплитуды механических колебаний в процессе настройки УЗ технологических аппаратов, при проведении сравнительных исследований и калибровки системы, создаваемой для непрерывного контроля амплитуды в процессе реализации технологических процессов в любых условиях, без внесения внешних датчиков.

2. Определение контролируемого электрического параметра пьезоэлектрической колебательной системы, характеризующего амплитуду механических колебаний излучающей поверхности с максимальной достоверностью, на основании исследования физических процессов, происходящих в пьезопреобразователе и электронном генераторе в процессе работы, и анализ выявленных зависимостей контролируемых электрических параметров пьезопреобразователя от свойств обрабатываемой среды.

3. Теоретическое обоснование и практическое подтверждение эффективности контроля амплитуды УЗ колебаний по изменению выбранного электрического параметра УЗ колебательной системы – электрического тока механической ветви.

4. Разработка и создание системы непрерывного контроля амплитуды механических колебаний в составе многофункциональных УЗ аппаратов (электронных генераторов с различными УЗ пьезоэлектрическими колебательными системами) для автоматического обеспечения оптимального УЗ воздействия.

5. Практическая реализация и выявление границ применимости предложенных систем контроля амплитуды колебаний пьезоэлектрической колебательной системы с различными рабочими инструментами не только в процессе создания, настройки, диагностики и ремонта (при остановке технологических процессов), но и в процессе реализации технологических процессов.

6. Разработка методики и практическая реализация метода автоматической калибровки аппаратов со сменными рабочими инструментами различной длины и формы для ускорения и повышения точности настройки ультразвуковых аппаратов.

7. Практическая реализация систем контроля, в т.ч. интегрированных в состав технологических аппаратов, разработка рекомендаций по организации контроля амплитуды механических колебаний ультразвуковых технологических аппаратов в условиях настройки и эксплуатации.

**Объектами исследования** являются системы контроля, основанные на прямых и косвенных методах измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрических колебательных систем, используемых при реализации процессов, основанных на УЗ воздействии.

#### **Методы исследования.**

В работе использованы методы анализа формы и параметров электрических сигналов, оптические методы измерения, методы цифровой обработки информации, методы математической статистики и обработки экспериментальных данных.

При проведении исследований использованы аналитический и экспериментальный методы. Аналитический метод использован для анализа процессов преобразования энергии в электронном генераторе и пьезоэлектрическом преобразователе под влиянием внешней среды. Экспериментальный метод использован для получения зависимостей амплитуды УЗ колебаний от электрического тока механической ветви УЗ колебательной системы.

#### **Научную новизну составляют:**

1. Новый метод оптического контроля амплитуды колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрических колебательных систем, реализуемый посредством визуального наблюдения через микроскоп светотеневых изображений, которые создаются импульсными источниками света, синхронизированными с моментами максимальных колебательных смещений излучающей поверхности, а также предусматривающий возможность автоматизации процесса регистрации и обработки результатов. Новизна технического решения подтверждена патентом РФ №2292530.

2. Предложенный и разработанный новый метод непрерывного контроля амплитуды механических колебаний излучающей поверхности колебательных систем при реализации ультразвукового воздействия, основанный на контроле электрического параметра колебательной системы – тока механической ветви пьезопреобразователя.

3. Выявленные в результате экспериментальных исследований зависимости изменения амплитуды механических колебаний излучающей поверхности от величины электрического тока механической ветви пьезопреобразователя, позволившие предложить и разработать методику контроля для различных по функциональному назначению колебательных систем с различными по длине, диаметру и форме концентраторами и сменными рабочими инструментами.

4. Метод калибровки, обеспечивающий автоматическую настройку системы контроля амплитуды колебательных систем со сменными рабочими инструментами различной длины и формы.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработан и практически реализован новый метод оптического контроля амплитуды механических колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрических колебательных систем, основанный на визуальном наблюдении через микроскоп светотеневых изображений, которые создаются импульсными источниками света, синхронизированными с моментами максимальных колебательных смещений, пригодный для применения в прозрачных средах и для калибровки систем контроля, основанных на других принципах контроля амплитуды УЗ колебаний.

2. Разработана и практически реализована система непрерывного контроля амплитуды колебаний для поддержания выходных параметров электронных генераторов и колебательных систем на заданном уровне для реализации оптимального УЗ воздействия.

3. Разработаны и реализованы на практике схемные и алгоритмические решения, а также методические рекомендации, позволившие интегрировать систему контроля амплитуды колебаний в существующие системы управления серийно выпускаемых УЗ аппаратов.

#### **Апробация работы.**

Материалы диссертации докладывались на Всероссийских научно-практических конференциях «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП)» 2004 г. и 2010 г. (г. Бийск), Четвертой научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург), международных конференциях-семинарах: Шестой международной сибирской конференции по электронным приборам и материалам EDM 2005 г. (г. Новосибирск), Седьмой международной конференции по электронным приборам и материалам EDM 2006 г. (г. Новосибирск), Восьмой сибирской конференции по электронным приборам и материалам EDM 2007 г. (г. Новосибирск), Девятом международном конференции-семинаре по электронным приборам и материалам EDM 2008 г. (г. Новосибирск), Международных конференциях-семинарах по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM 2009–2010 гг. (г. Новосибирск).

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, были использованы при выполнении НИОКР: «Развитие научных основ повышения эффективности ультразвуковых технологий, исследование процессов взаимодействия ультразвуковых колебаний высокой интенсивности с веществом, разработка и организация производства ультразвуковых аппаратов для повышения эффективности технологических процессов (2005–2009 гг.)». Регистрационный номер НИОКР – 01.02.0509063 и НИОКР по Государственному контракту №П2518 от 20.11.2009 г.: «Разработка и создание высокоэффективных электроакустических преобразователей для интенсификации процессов в газовых средах», также в ряде договоров БТИ (филиала) АлтГТУ на выполнение НИР.

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, были использованы при подготовке образцов ультразвуковых аппаратов, выставленных на IX Всероссийской выставке Научно-технического творчества молодежи НТТМ-2009 г. (г. Москва) (диплом первой степени).

#### **Реализация результатов.**

Результаты работы использованы при разработке, создании конструкторской документации и УЗ технологических аппаратов различного назначения (для сварки полимерных термопластичных материалов, кавитационной обработки жидких сред, коагуляции аэрозолей, размерной обработки высокотвердых и хрупких материалов и др.) и нашли промышленное применение на предприятиях РФ, таких как ФГУП НМЗ «Искра» (г. Новосибирск), ФГУП «Центр Келдыша» (г. Москва), ГУЗ «Алтайская краевая станция переливания крови», Муромский электромеханический завод (г. Муром), ОАО «Биофизическая аппаратура» (г. Москва), ООО «М-Компас» (г. Москва), ООО «ПК Технотрон» (г. Набережные Челны), ЗАО «Уралпромснаб» (г. Челябинск), ООО «Уралполимериндустрия» (г. Уфа), Торгово-промышленная группа «Альт-А» (г. Новосибирск), ОАО «Бифин» (г. Кемерово).

Результаты работы используются в учебном процессе Бийского технологического института в рамках курсов «Применение ультразвука в технике», «Применение ультразвука в химической технологии», «Применение ультразвука в пищевой промышленности» для специальностей приборостроительного и химического направлений. Предложенные методы контроля амплитуды используются при проведении научных исследований в БТИ и малом инновационном предприятии ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ».

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Повышение точности и обеспечение автоматизации процесса контроля амплитуды механических колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрических колебательных систем предложенным и разработанным методом визуального наблюдения через микроскоп светотеневых изображений, которые создаются импульсными источниками света, синхронизированными с моментами максимальных колебательных смещений излучающей поверхности.

2. Выявленная и обоснованная возможность контроля амплитуды колебаний пьезопреобразователей на основании контроля составляющей электрического тока, протекающей через пьезопреобразователь и являющейся разностью между полным током преобразователя и его составляющей, которая обусловлена собственной электрической емкостью пьезоэлементов.

3. Созданная система контроля, интегрированная в состав УЗ аппаратов и обеспечивающая возможность непрерывного контроля для эффективного УЗ воздействия и управления процессами.

4. Методика контроля предложенными методами при помощи разработанных устройств, обеспечивающая не только контроль амплитуды любых рабочих инструментов из комплектации аппарата, но и автоматическое определение типа присоединенного инструмента для обеспечения с его помощью режимов оптимального УЗ воздействия.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК, – 4, получены один патент на изобретение, два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка использованных источников из 123 наименований; содержит 160 страниц машинописного текста, 66 рисунков, 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, научная и практическая значимость, сформулированы цель работы и ее научная новизна, изложены основные, выносимые на защиту положения, приведена краткая характеристика работы.

**В первой главе** проводится анализ известных методов измерения, которые возможно применить (в некоторых случаях с большими ограничениями) для контроля амплитуды механических колебаний излучающих поверхностей, совершаемых с ультразвуковой частотой.

В первой части главы рассматриваются методы, обеспечивающие прямое измерение амплитуды колебаний. Наиболее простыми в реализации являются контактные методы. Но непосредственный механический контакт колеблющейся поверхности и чувствительного элемента измерительного преобразователя может влиять на параметры контролируемых колебаний, внося искажения и погрешности. Несмотря на это достаточно широкое распространение получил пьезоэлектрический датчик с сухим точечным контактом. Он удобен для контроля качества сборки многоэлементных пьезопреобразователей, измерения механической добротности и резонансной частоты отдельного элемента или всего преобразователя в целом. Широкое применение метода ограничивается механической прочностью датчика (максимальная амплитуда колебаний не более 10 мкм) и возможностью получения только относительных значений амплитуды.

Бесконтактные методы измерения обладают большей точностью и не оказывают влияния на объект контроля. Рассмотрены оптические (лазерные, волоконно-оптические и др.), индукционные и емкостные методы измерения. Особенностью индукционных и емкостных методов является необходимость калибровки датчика под конкретный тип колебательной системы для получения абсолютных значений амплитуды из-за влияния на результаты измерения формы колебательной системы, ее материала, зазора между датчиком и излучающей поверхностью. Существует много вариантов использования лазерного излучения для контроля амплитуды, но все они сложны в реализации, требуют подготовки излучающей поверхности и имеют ограниченный динамический диапазон.

Наибольший интерес представляет метод непосредственного наблюдения через микроскоп, не требующий предварительной калибровки. Такой метод прост в реализации и позволяет по размытости изображения получать абсолютные значения амплитуды колебаний. Присущие методу недостатки частично удается устранить, используя стробоскопический источник излучения. Контроль амплитуды производится следующим образом: источник световых импульсов синхронизируется с рабочей частотой пьезопреобразователя. Регулируя фазу



импульса относительно фазы колебаний, последовательно находят положения противоположных максимальных смещений излучающей поверхности. Амплитуду определяют как половину расстояния между найденными положениями.

Стробоскопический метод сохраняет все преимущества метода наблюдения через микроскоп, обеспечивая более точное определение граничных положений. Однако невозможность одновременного определения противоположных граничных положений снижает производительность и точность контроля амплитуды (особенно в условиях их низкочастотной модуляции). Кроме того, метод сложно автоматизировать.

Проведенный анализ показывает принципиальную невозможность применения всех известных методов, обеспечивающих прямое измерение амплитуды, непосредственно при реализации технологических процессов (т.е. при невозможности визуального наблюдения колеблющейся поверхности). Поэтому в этом направлении требуется поиск и разработка нового метода контроля амплитуды колебаний.

Наиболее перспективным является использование в качестве датчика самого пьезопреобразователя, поскольку выходные параметры пьезопреобразователя зависят от параметров электрического питания. Поэтому следует выявить электрическую величину на входе преобразователя, определяющую значение амплитуды механических колебаний. Анализ был проведен по эквивалентной схеме замещения пьезопреобразователя в прирезонансной области (рисунок 1, а), полученной с помощью универсального метода У. Мэсона и метода электромеханических аналогий.

В представленной схеме  $L_M$  является эквивалентом колеблющейся массы пьезопреобразователя,  $C_M$  – эквивалент гибкости преобразователя,  $R_M$  – сопротивление механических и диэлектрических потерь,  $R_H$  – сопротивление излучению,  $C_K$  – электрическая емкость пьезоэлементов.

В общем случае импеданс технологической среды является комплексной величиной, но применение специальных способов согласования электронного генератора с колебательной системой позволяет компенсировать реактивную составляющую сопротивления технологической среды.

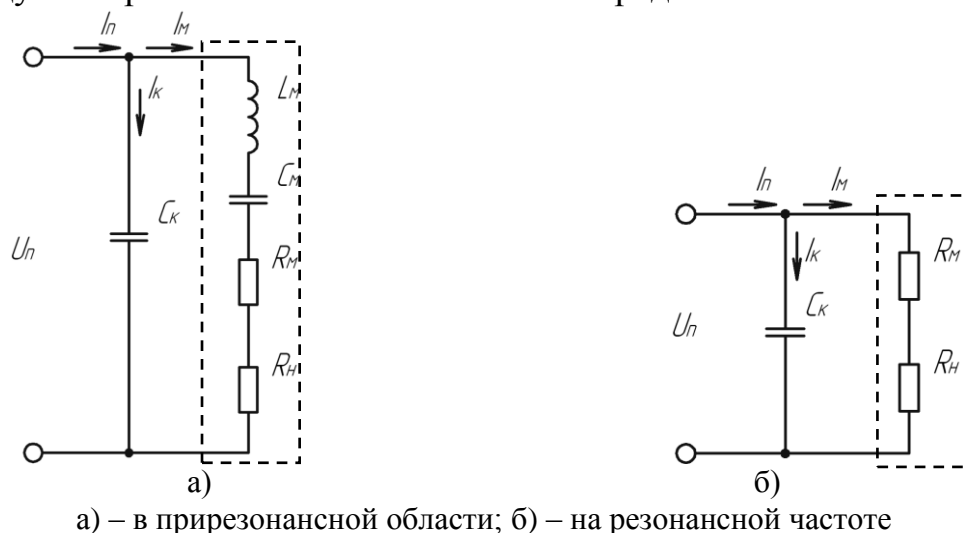


Рисунок 1 – Схемы замещения пьезоэлектрической колебательной системы

Элементы  $L_M$ ,  $C_M$ ,  $R_M$ ,  $R_H$  образуют так называемую механическую ветвь эквивалентной электрической схемы пьезопреобразователя. На резонансной частоте последовательного резонансного контура  $L_M C_M$  реактивная составляющая схемы замещения определяется только емкостью  $C_K$  и схему замещения удобно представить в следующем виде (рисунке 1, б).

Анализ эквивалентной схемы пьезопреобразователя позволил установить, что значение амплитуды колебаний в интервале линейности свойств пьезопреобразователя определяется величиной тока механической ветви (т.е. разницей между полным током колебательной системы и его емкостной составляющей, обусловленной собственной электрической емкостью пьезоэлементов преобразователя), т.е. может быть найдено из зависимости:

$$A = M \cdot I_M,$$

где  $A$  – амплитуда механических колебаний пьезопреобразователя;  $I_M$  – ток механической ветви пьезопреобразователя;  $M$  – коэффициент пропорциональности.

Такой метод контроля амплитуды колебаний не получил практического распространения из-за отсутствия информации о значении и зависимости величины коэффициента пропорциональности от параметров пьезопреобразователя. Теоретический анализ этой зависимости осложняется отсутствием необходимых данных о взаимодействии пьезопреобразователя с исследуемой средой. Кроме того, недостатком метода является необходимость в двух дополнительных методах контроля. Первый необходим для калибровки. Второй необходим для контроля величины тока, протекающего в механической ветви пьезопреобразователя.

В завершение первой главы сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена разработке и совершенствованию методов контроля амплитуды механических колебаний.

Поскольку выявленные недостатки не позволяют эффективно использовать стробоскопический метод контроля, для их устранения предложено осуществлять освещение колеблющейся поверхности в течение одного периода колебаний не одним, как в базовом, а двумя световыми импульсами, формируемыми источниками, отличающимися длиной волны (цветом) излучения. Моменты формирования импульсов излучения синхронизируются с противоположным максимальным колебательными смещениями. При наблюдении в проходящем свете наблюдаемое изображение будет состоять из трех зон. Ширина второй зоны равна удвоенной амплитуде (размаху) колебаний. Схема формирования изображения представлена на рисунке 2.

Предложенный метод обеспечивает одновременное наблюдение распределения амплитуды колебаний вдоль всей поверхности, видимой в окуляр микроскопа. Причем колебания, совершаемые с противоположными фазами, будут наблюдаться как имеющие различные цвета свечения (рисунок 3). Такая возможность появилась только при использовании предложенного метода.

Для обработки результатов контроля амплитуды в автоматическом режиме было предложено два метода регистрации световых потоков.

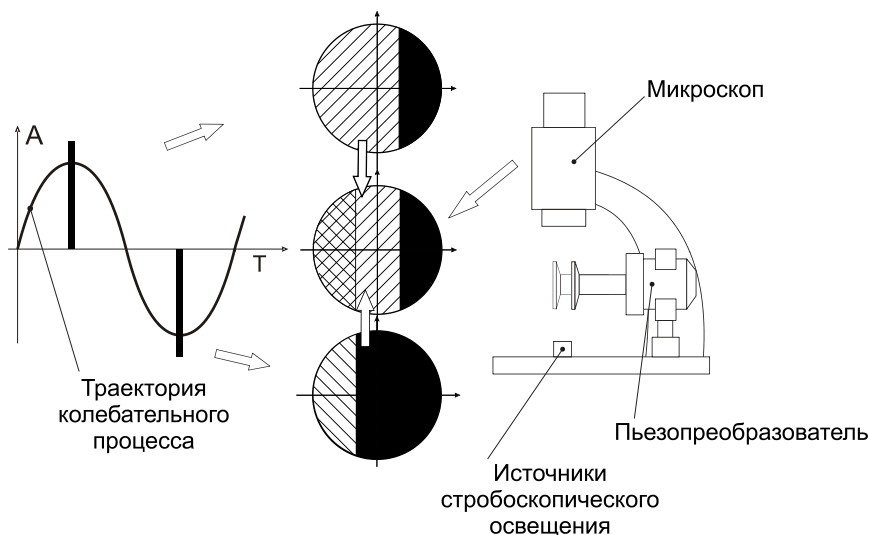


Рисунок 2 – Схема формирования изображения в стробоскопическом методе контроля

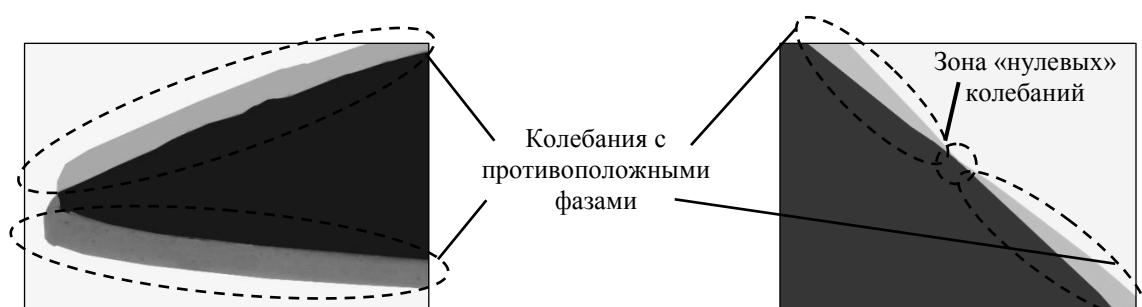


Рисунок 3 – Распределение амплитуды колебаний вдоль рабочей поверхности УЗКС

Первый метод заключается в преобразовании световых потоков в цифровой образ посредством серийной цифровой фотокамеры или специализированного устройства, базирующегося на линейных или растровых матрицах светочувствительных элементов, и последующей обработке.

Обработка изображения может быть реализована как с помощью ПК, так и с помощью микропроцессорных средств. Алгоритм обработки заключается в разложении цифрового образа на отдельные световые компоненты (красного, зеленого и синего цветов), их бинаризации, выделении разностной области и последующем измерении ширины данной области и пересчете в значение амплитуды по следующей зависимости:

$$A = \frac{B}{2 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot R},$$

где  $M_1$  – коэффициент линейного увеличения (кратность) микроскопа;  $M_2$  – коэффициент линейного увеличения объектива устройства графического ввода;  $R$  – разрешающая способность устройства графического ввода;  $B$  – ширина полосы, выраженная в количестве элементов растрового изображения.

Если определение коэффициентов  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $R$  затруднительно, возможна калибровка оборудования по образцовым линейным мерам. В этом случае амплитуда колебаний определяется выражением:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{B}{B_0} \cdot b,$$

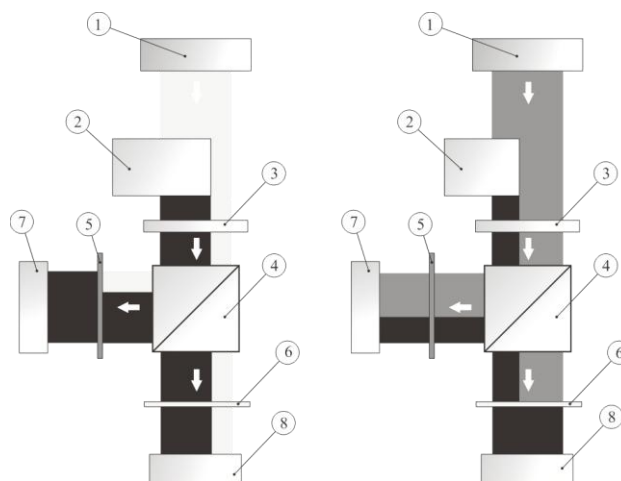
где  $B_0$  – ширина изображения образцовой меры, выраженная в количестве элементов растрового изображения,  $b$  – ширина образцовой меры, выраженная в микрометрах.

Предложенный и разработанный метод регистрации может обеспечивать высокую точность (посредством увеличения разрешения цифрового образа), но ценой увеличения вычислительных и временных (увеличение времени передачи цифрового образа в ПК) затрат, поэтому его целесообразно применять для калибровки других средств контроля амплитуды колебаний.

Для увеличения быстродействия был разработан второй метод регистрации изображения (рисунок 4), сущность которого состоит в следующем. Перекрываемый пьезопреобразователем световой поток пропускают через ограничительную диафрагму. Не перекрытую часть светового потока разделяют на два равных, при этом один из них проходит через светофильтр, пропускающий только излучение, имеющее длину волны излучения первого импульсного источника излучения, а второй проходит через другой светофильтр, пропускающий только излучение, имеющее длину волны излучения второго импульсного источника излучения. Каждый световой поток падает на отдельный преобразователь «освещенность–напряжение».

Соответственно, амплитуда будет равна:  $A = Q_2 U_2 - Q_1 U_1$ , где  $Q_1$  и  $Q_2$  – коэффициенты пропорциональности, которые необходимо определить в процессе калибровки.

Таким образом, предложенный стробоскопический метод исключает ошибку субъективного восприятия оператора, обеспечивает одновременное наблюдение двух граничных положений, значительное увеличению скорости контроля и возможность автоматизации процесса контроля.



1 – импульсные источники света; 2 – колеблющееся тело; 3 – диафрагма; 4 – полупрозрачное зеркало; 5, 6 – светофильтр; 7, 8 – преобразователь «освещенность–напряжение»

Рисунок 4 – Схемы преобразования световых потоков

Во второй части главы представлены метод и практическая реализация выделения сигнала, пропорционального величине тока механической ветви пьезопреобразователя.

Для выделения тока механической ветви наиболее простым является разностный метод. Известные мостовые схемы и схемы с дифференциальным

трансформатором, в которых используется дополнительное комплексное сопротивление, равное сопротивлению собственной емкости пьезоэлектрических элементов, обеспечивают компенсацию только конкретного значения емкости пьезоэлектрических элементов, при изменении которого (например, из-за нагрева) сигнал на выходе схемы уже не будет пропорционален току механической ветви.

Для устранения этого недостатка предложено вместо дифференциального трансформатора использовать дифференциальный усилитель, сигналы к которому подводятся от токовых датчиков через усилители, с регулируемым коэффициентом усиления. Схемная реализация представлена на рисунке 5.

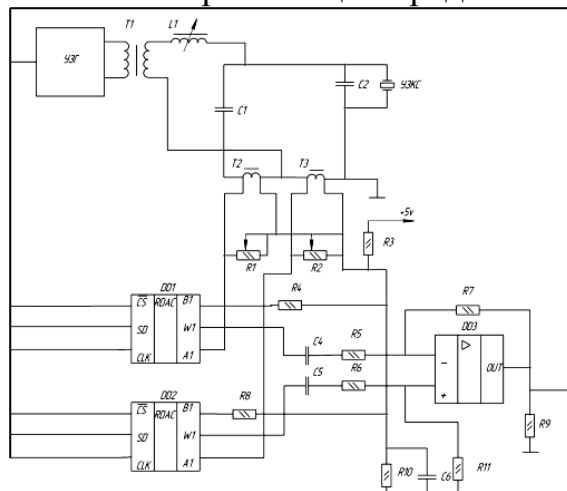


Рисунок 5 – Схема выделения тока механической ветви

Сигнал на выходе дифференциального усилителя равен:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_2 K_{T2} (I_{\text{дон}} + I_M) - K_1 K_{T1} I_K,$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты усиления усилителей К1 и К2;  $K_{T1}$  и  $K_{T2}$  – коэффициенты трансформации трансформаторов Т2 и Т3.

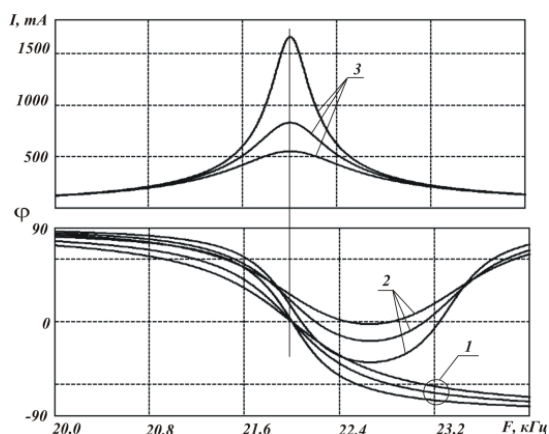
При выполнении условия  $K_{T1} K_1 I_K = K_{T2} K_2 I_{\text{дон}}$  следует:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_2 K_{T2} I_M.$$

Таким образом, путем подбора только коэффициентов усиления  $K_1$  и  $K_2$  возможно изменение условий компенсации емкостной составляющей тока при изменении величины собственной емкости пьезоэлементов (балансировка). Для этого используются цифровые переменные резисторы DD1 и DD2, управляемые посредством микроконтроллера УЗ генератора.

На рисунке 6 и рисунке 7 представлены результаты теоретического расчета ФЧХ тока, потребляемого пьезопреобразователем от генератора, а также АЧХ и ФЧХ тока механической ветви пьезопреобразователя в зависимости от изменения сопротивления излучению  $R_H$  и изменения электрической емкости пьезоэлементов.

Из-за наличия статической емкости  $C_K$  пьезоэлементов точки равенства нулю фазы тока, протекающего через колебательную систему, и фазы тока, протекающего через механическую ветвь, не совпадают. Частотные характеристики именно тока механической ветви наиболее точно отражают резонансные свойства пьезопреобразователя и свободны от влияния изменения собственной емкости и сопротивления излучению.



1 – ФЧХ тока механической ветви; 2 – ФЧХ тока, потребляемого от генератора; 3 – АЧХ тока механической ветви

Рисунок 6 – Частотные характеристики в зависимости от изменения сопротивления излучению  $R_H$

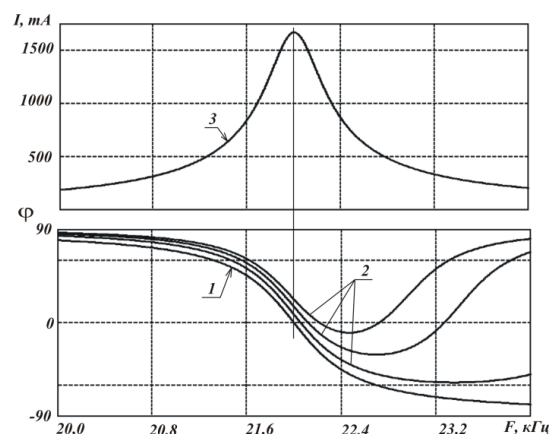


Рисунок 7 – Частотные характеристики в зависимости от изменения электрической емкости пьезоэлементов

Влияние всех параметров преобразования и усиления электрической и механической энергии определяется при проектировании конструкции колебательной системы и настройке электронного генератора и не изменяется в течение всего срока эксплуатации УЗ аппарата. При использовании сменных рабочих инструментов возможно изменение характера преобразования энергии колебаний, поскольку сменные инструменты могут иметь различную длину, форму перехода диаметра инструмента и т.д. Теоретический анализ показал, что значение коэффициента пропорциональности  $M$  с максимальной точностью характеризует коэффициент усиления пьезопреобразователя и может быть представлено как:

$$M = M' \cdot K_{yc},$$

где  $M'$  – коэффициент пропорциональности между величиной тока механической ветви и амплитудой механических колебаний, не учитывающий коэффициента усиления УЗКС;  $K_{yc}$  – коэффициент усиления УЗКС с закрепленным сменным рабочим инструментом.

В результате были разработаны все схемные и технические решения, проведены все теоретические исследования, необходимые для эффективной практической реализации предложенных методов контроля.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на выявление зависимости амплитуды колебаний излучающей поверхности пьезопреобразователя от изменения его электрических характеристик и практическое подтверждение эффективности созданных методов и средств контроля.

Для проведения практических исследований был выбран серийный аппарат «Тонзиллор-ММ» производства ООО «Метромед» (г. Омск), поскольку он комплектуется набором сменных рабочих инструментов различной формы и длины, что позволяет обеспечить достаточное разнообразие условий эксперимента. Внешний вид набора рабочих инструментов представлен на рисунке 8. Инструменты отличаются по длине (полуволновые рабочие инструменты № 4–7 и двухполуволновые рабочие инструменты № 1–3) и имеют

различные диаметры торцевой присоединительной поверхности. Стандартная схема системы управления электронного генератора была дополнена предложенной схемой контроля тока механической ветви.

Контроль проводился при отсутствии акустической нагрузки на рабочий инструмент (излучении в воздух) для обеспечения возможности контроля амплитуды колебаний стробоскопическим методом. Полученные зависимости амплитуды колебаний от величины тока механической ветви представлены на рисунке 9.



Рисунок 8 – Внешний вид сменных рабочих инструментов

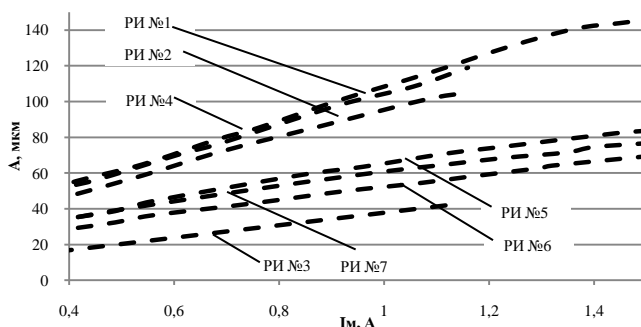


Рисунок 9 – Зависимость амплитуды колебаний от тока механической ветви

Результаты анализа полученной зависимости подтверждают, что зависимость амплитуды колебаний от тока механической ветви является линейной для всех сменных рабочих инструментов во всем рабочем диапазоне амплитуд (от 25 до 90–150 мкм для разных типов инструментов), и отличаются только углом наклона.

Излучение в газовые среды в реальной практике применения УЗ колебаний практически не встречается. Поэтому дальнейшие исследования заключались в исследовании влияния акустической нагрузки на исследуемую зависимость. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 10.

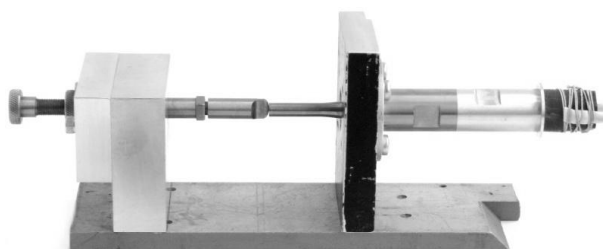


Рисунок 10 – Внешний вид установки, позволяющей изменять усилие прижима к излучающей поверхности

За начальное состояние принималось значение питающего напряжения, обеспечивающее амплитуду колебаний 60 мкм. Затем к излучающей поверхности прижимался демпфирующий элемент. Конечным усилием прижима принималось усилие, при котором величина питающего напряжения увеличивалась на 50 % по отношению к начальному состоянию. Анализ результатов эксперимента показал, что в пределах исследованных акустических нагрузок стабилизация величины тока механической ветви обеспечивает стабилизацию амплитуд механических колебаний, причем отклонение от начального значения амплитуды (при отсутствии акустической нагрузки) не превышает 7 %. Полученные результаты

были подтверждены при проведении исследований с применением других УЗ аппаратов. Серия светотеневых изображений колебательного процесса представлена на рисунке 11.

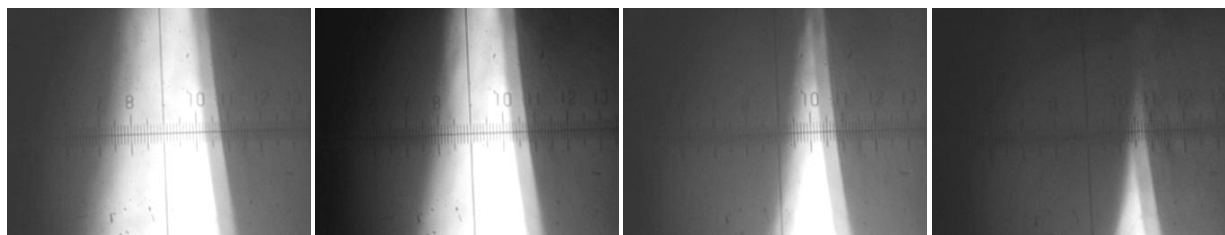


Рисунок 11 – Серия светотеневых изображений колебательного процесса, полученных при изменении усилия прижима

Таким образом доказано, что значение акустической нагрузки (изменение плотности, вязкости и т.п.) не влияет на точность полученных зависимостей и величину коэффициента  $M$ .

Для дальнейшего анализа характера зависимостей была проведена линейная аппроксимация полученных данных зависимостью вида:  $A = M \cdot I_M + C$ , где  $C$  – это значение амплитуды механических колебаний в точке пересечения с осью ординат. Отличное от нуля значение  $C$  объясняется более сложной формой зависимости амплитуды от величины тока при малых значениях.

Все полученные данные сведены в итоговую таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты линейной аппроксимации экспериментальных данных

Номер рабочего инструмента	$C$	$M$	$K_{\text{УС}}$	$M'$
1	20,8	32,3	28,1	1,15
2	19,8	32,5	28,5	1,14
3	17	31,2	28,5	1,09
4	19,5	15,7	14,7	1,06
5	16,6	18,7	16,6	1,13
6	18,5	16,0	15,4	1,05
7	20,1	14,3	13,2	1,09

Значение коэффициента  $M'$  не зависит от типа рабочего инструмента и является величиной постоянной (отклонение от среднего значения не превышает 5 %). Т.е. процесс калибровки набора сменных рабочих инструментов можно значительно ускорить, произведя калибровку и расчет значение  $M'$  только для одного любого рабочего инструмента.

Таким образом, проведенные исследования экспериментально подтвердили возможность контроля амплитуды механических колебаний пьезоэлектрической колебательной системы по величине электрического тока механической ветви и показали адекватность такого метода контроля и возможность его применения непосредственно в процессе реализации любого технологического процесса.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования функциональных возможностей многофункциональных ультразвуковых аппаратов, оснащенных системой непрерывного контроля амплитуды колебаний.

Для этих целей были проведены сравнительные испытания двух образцов ультразвуковых технологических аппаратов серии «Волна» предназначенных для обработки жидких сред. Первый аппарат оснащен предложенной и разработанной системой непрерывного контроля амплитуды колебаний. Второй аппарат



осуществляет контроль выходных параметров по величине полного тока, потребляемого пьезопреобразователем. Для контроля акустической мощности, излучаемой в среду, использовался калориметрический метод. Полученные данные приведены на рисунке 12.

Как следует из представленных зависимостей, вводимая акустическая мощность при стабилизации полного тока, потребляемого пьезопреобразователем, достаточно быстро снижается (рисунок 12, а), это связано с изменением электрических характеристик пьезопреобразователя из-за изменения температуры пьезоэлементов и изменения свойств обрабатываемой среды. При стабилизации тока механической ветви вводимая в обрабатываемую среду акустическая мощность снижается незначительно (рисунок 12, б). Таким образом, предложенный и разработанный метод обеспечивает стабилизацию амплитуды колебаний, а следовательно, и зависящих от амплитуды выходных параметров ультразвукового аппарата (акустическая мощность, интенсивность).

Далее были проведены исследования, доказывающие, что предложенный метод контроля амплитуды обеспечивает наиболее выгодный энергетический режим работы (рисунок 13), а следовательно, и максимальный КПД аппарата. Производился контроль потребляемой пьезопреобразователем электрической мощности при увеличении составляющей тока, протекающей по собственной емкости пьезоэлементов. Амплитуда колебаний пьезопреобразователя поддерживалась постоянной. Для контроля потребляемой электрической мощности использовался анализатор качества электрической энергии МТ 1010 фирмы Motech. Поскольку в третьей главе было доказано, что изменение собственной емкости пьезоэлементов приводит к смещению фазочастотной характеристики, то для имитации этого процесса вводилась искусственная задержка между фазами тока механической ветви и питающим напряжением. Таким образом, предложенный метод эффективен при эксплуатации аппаратов, т.е. для контроля эффективности реализуемых процессов.

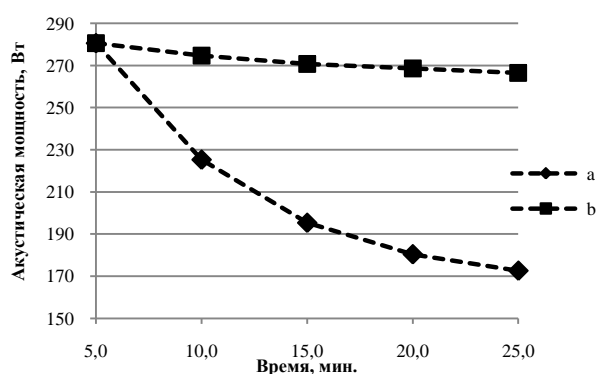


Рисунок 12 – Зависимость акустической мощности в процессе реализации технологического процесса: а – контроль полного тока питания пьезопреобразователя; б – контроль тока механической ветви

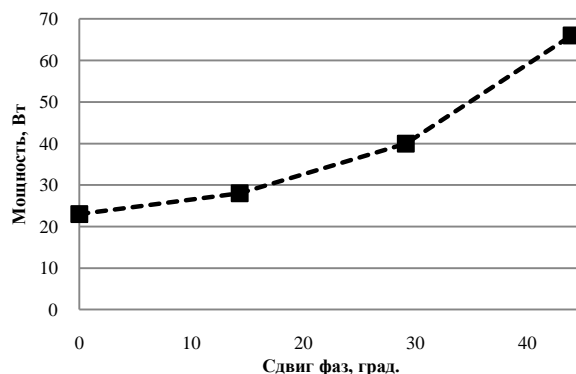


Рисунок 13 – Зависимость потребляемой электрической мощности пьезопреобразователем от сдвига фаз между питающим током и напряжением при стабилизации амплитуды колебаний 70 мкм

Далее в четвертой главе представлены результаты сравнительных исследований двух пьезопреобразователей, построенных по существенно отличающимся конструктивным схемам. Анализ результатов позволил сделать

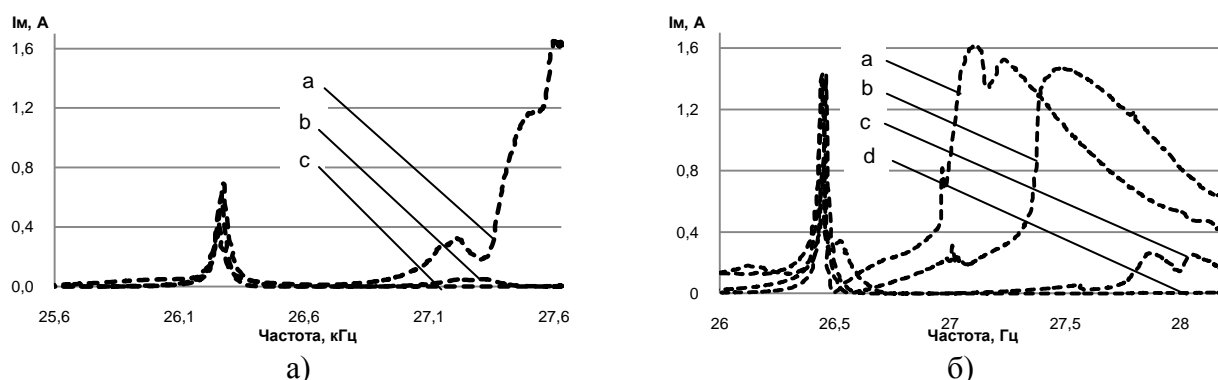
предварительную оценку резонансных свойств преобразователей, которые подтвердились в ходе их практической эксплуатации. Таким образом, предложенный метод контроля может быть использован при создании новых систем.

При использовании сменных рабочих инструментов весьма важен акустический контакт между рабочим инструментом и пьезопреобразователем. Были проведены исследования частотных характеристик пьезопреобразователя при различных значениях акустического контакта.

Для исследования использовался УЗ терапевтический аппарат «Тонзиллор-ММ» с набором сменных рабочих инструментов, аналогичным используемому в предыдущих исследованиях. Нормирование величины акустического контакта производилось изменением угла поворота рабочего инструмента.

Для каждого рабочего инструмента были получены АЧХ и ФЧХ для каждого угла поворота. На рисунке 14 представлены АЧХ рабочих инструментов, обладающих наиболее характерным видом для других инструментов аналогичной длины.

Анализ экспериментальных данных показал, что акустический контакт влияет на форму и параметры АЧХ и ФЧХ пьезопреобразователя, и степень влияния в первую очередь зависит от длины сменного рабочего инструмента (чем больше длина, тем больше искажения).



а) – с рабочими инструментами двухполуволновой длины; б) – с рабочими инструментами трехполуволновой длины

Рисунок 14 – АЧХ колебательной системы: а – угол поворота  $8^\circ$ ; б – угол поворота  $16^\circ$ ; с – угол поворота  $24^\circ$ ; д – угол поворота  $32^\circ$

Разработанный метод контроля позволил установить, что критерием недостаточности акустического контакта является резкое увеличение величины тока механической ветви в конце частотного диапазона поиска резонансной частоты, но при наличии ярковыраженного резонанса в середине частотного диапазона. Количественную оценку можно дать по отношению амплитуды тока в конце частотного диапазона к амплитуде тока на частоте собственного резонанса. Если это отношение превышает значение 0,3–0,5, то гарантировать работу преобразователя в номинальном режиме нельзя.

Таким образом, предложенный метод может быть использован для контроля параметров самого технологического аппарата, т.е. контроля эффективности его работы.

Проведенные исследования доказали, что предложенные и разработанные методы контроля амплитуды обеспечивают получение достоверной информации об амплитуде колебаний пьезопреобразователя как в процессе проектирования и настройки, так и непосредственно в процессе реализации различных технологических процессов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В результате выполнения работы решена задача контроля амплитуды механических колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрической колебательной системы в течение всего жизненного цикла ультразвукового аппарата (в ходе настройки, диагностики и ремонта, и непрерывный контроль в процессе реализации технологических процессов).

При этом решены следующие частные задачи:

1. Предложен и разработан метод оптического контроля амплитуды механических колебаний излучающей поверхности в прозрачных средах, основанный на использовании двух источников стробоскопического излучения, которые синхронизированы с максимальными колебательными смещениями колеблющейся поверхности: обеспечивший устранение погрешности, которая связана с субъективным восприятием человека; увеличение быстродействия; предусматривающий автоматизацию процесса контроля и не требующий калибровки.

2. На основании исследования физических процессов, происходящих в пьезоэлектрической колебательной системе и электронном генераторе в процессе работы в различных условиях, и анализа выявленных зависимостей контролируемых электрических параметров пьезопреобразователя от свойств обрабатываемой среды выявлен электрический параметр (потребляемый пьезопреобразователем ток, свободный от емкостной составляющей), максимально достоверно характеризующий амплитуду механических колебаний излучающей поверхности.

3. Теоретически и экспериментально подтверждена эффективность контроля амплитуды колебаний по изменению выбранного электрического параметра УЗ колебательной системы (электрического тока механической ветви).

4. Экспериментально подтверждена эффективность предложенного и разработанного метода непрерывного контроля амплитуды колебаний по току механической ветви при проведении сравнительных исследований колебательных систем различной конструкции, а также экспериментально подтверждена возможность косвенной оценки качества акустического контакта между пьезопреобразователем и сменным рабочим инструментом.

5. Реализующее разработанный метод схемное решение непрерывного контроля амплитуды колебаний включено в состав ряда мелкосерийно выпускаемых многофункциональных УЗ аппаратов (электронных генераторов с УЗ пьезоэлектрическими колебательными системами), что обеспечило непрерывный контроль амплитуды для установления в автоматическом режиме выходных параметров на требуемом уровне для поддержания оптимального УЗ воздействия.

6. Разработана методика и практическая реализация метода автоматической калибровки аппаратов со сменными рабочими инструментами различной длины и формы для ускорения и повышения точности настройки УЗ аппаратов.

7. Разработаны схемные решения, реализующие предложенные методы контроля, а также разработаны рекомендации по организации контроля амплитуды механических колебаний ультразвуковых технологических аппаратов в условиях настройки и эксплуатации.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$L_M$  – индуктивность механической ветви, Гн;  $C_M$  – емкость механической ветви, Ф;  $R_M$  – сопротивление механической ветви, Ом;  $R_H$  – сопротивление излучению, Ом;  $R_D$  – сопротивление диэлектрических потерь, Ом;  $C_K$  – емкость пьезокерамических элементов, Ф;  $A$  – амплитуда механических колебаний излучающей поверхности пьезопреобразователя, м;  $I_M$  – ток механической ветви пьезопреобразователя, А;  $M$  – коэффициент пропорциональности между током механической ветви и амплитудой колебаний;  $M'$  – коэффициент пропорциональности, не учитывающий коэффициента усиления пьезопреобразователя;  $K_{\text{вс}}$  – коэффициент усиления пьезопреобразователя;  $B_0$  – ширина изображения образцовой меры, выраженная в количестве элементов растрового изображения (пиксель);  $b$  – ширина образцовой меры, м;  $M_1$  – коэффициент линейного увеличения (кратность) микроскопа;  $M_2$  – коэффициент линейного увеличения объектива устройства графического ввода;  $R$  – разрешающая способность устройства графического ввода.

## Список литературы

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. **Абраменко, Д. С.** Способ контроля амплитуды ультразвукового воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов, Д.В. Генне // Журнал «Датчики и системы», 2010. – № 12. – С. 43–47.

2. **Абраменко, Д. С.** Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – №4. – С. 139–143.

3. **Абраменко, Д. С.** Особенности проектирования электронных генераторов для излучателей, предназначенных для воздействия на газовые среды [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко, Д.В. Генне, А.Д. Абрамов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 77–81.

4. **Абраменко, Д. С.** Исследование и разработка устройства измерения амплитуды колеблющихся поверхностей [Текст] / Г.В. Леонов, В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Д.С. Абраменко // Известия Тульского государственного университета. – Тула: ТулГУ, 2006. – Вып. 5. – С. 116–123.

*Патенты на изобретения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:*

5. Способ измерения амплитуды колебаний [Текст]: пат. 2292530 Российская Федерация: МПК G 01 Н 9/00 / Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Абраменко Д.С., Савин И.И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2005111032/28; заявл. 14.04.2005; опублик. 27.01.2007, Бюл. № 3. – 10 с.: ил.

6. Программа управления работой ультразвукового терапевтического аппарата «Тонзиллор-ММ» [Текст] / Р.В. Барсуков, Д.В. Генне, М.В. Хмелев, Д.С. Абраменко, Е.В. Ильченко // Свидетельство РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010617784, 2010.

7. Программа управления процессом обработки жидких сред в кавитационном режиме [Текст] / Р.В. Барсуков, М.В. Хмелев, Д.С. Абраменко, Е.В. Ильченко // Свидетельство РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010617780, 2010.

*Статьи в журналах, доклады и тезисы докладов на конференциях:*

8. **Абраменко, Д. С.** Контроль параметров ультразвуковых технологических аппаратов [Электронный ресурс] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2010. – 13. – 13 с. – Режим доступа: <http://ejta.org/ru/khmelev7>.

9. **Абраменко, Д. С.** Измерение параметров ультразвуковых технологических аппаратов при реализации технологических процессов [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне, А.В. Шалунов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП–2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск, 2010. – С. 111–115.

10. **Abramenko, D.S.** System of Continuous Control of Output Parameters in Ultrasonic Technological Devices [Текст] / V.N. Khmelev, D.S. Abramenko, R.V. Barsukov, D.V. Genne // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 303–306., (ISBN 978–1–4244–6626–9, IEEE Catalog Number CFP10500–ART). <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-78049387214&origin=inward&txGid=aK9nZQ4oi7WMVOuGmeMKACA:7> document type: Conference Paper SOURCE: Scopus.

11. **Abramenko, D.S.** The features investigation of piezoelectric transducers [Text] / V.N. Khmelev, D.S. Abramenko, V.V. Pedder, S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2009. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 233–241. (ISBN 978–1–4244–4571–4, IEEE Catalog Number CFP09500–PRT). <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70350714401&partnerID=40&md5=05e36a5dd3c5214ef6e6a51d6801e4a0> document type: Conference Paper SOURCE: Scopus. (Исследование функциональных возможностей пьезоэлектрических преобразователей [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, В.В. Педдер, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, М.В. Хмелев // Международная конференция-семинар по микро/нанотехнологиям и

электронным приборам EDM'09: сборник трудов. – Новосибирск: ИПЦ ГОУ ВПО НГТУ, 2009. – С. 226–235.)

12. **Abramenko, D.S.** Investigation of influence of acoustical contact on parameters of ultrasonic oscillatory system [Text] / V.N. Khmelev, D.S. Abramenko, V.V. Pedder, S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, M.V. Khmelev // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2009. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 225–232., (ISBN 978–1–4244–4571–4, IEEE Catalog Number CFP09500–PRT). <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0350724523&partnerID=40&md5=678b4c7a72c88911bd8ac219b826cb6e> document type: Conference Paper SOURCE: Scopus. (Исследование влияния акустического контакта на параметры ультразвуковой колебательной системы [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, В.В. Педдер, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, М.В. Хмелев // Международная конференция-семинар по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM'09: сборник трудов. – Новосибирск: ИПЦ ГОУ ВПО НГТУ, 2009. – С. 217–225.)

13. **Abramenko, D.S.** Usage features of contact and noncontact measuring methods of oscillation amplitude during adjustment process of ultrasonic devices [Text] / V.N. Khmelev, D.S. Abramenko, R.V. Barsukov, A.N. Lebedev // 9th International workshop and tutorials on electron devices and materials EDM'2008. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.223–226., (ISBN 978–5–7782–0893–3, IEEE Catalog Number CFP08500–PRT). [http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-51949109313&partnerID=40&md5=40f6f86a31e8cbd1ec3f4e25cb\\_d06415](http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-51949109313&partnerID=40&md5=40f6f86a31e8cbd1ec3f4e25cb_d06415) document type: Conference Paper SOURCE: Scopus.

14. **Абраменко, Д. С.** Контроль параметров ультразвуковых генераторов для определения оптимальных режимов ультразвукового воздействия на различные среды [Текст] / Д.С. Абраменко, В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 11: Сборник трудов Четвертой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. – С. 141–142.

15. **Abramenko, D.S.** Measurement parameters of ultrasonic oscillatory system during welding thermoplastics [Text] / A.N. Slivin, A.D. Abramov, D.S. Abramenko // 8th siberian russian workshop and Tutorial on electron devices and materials EDM '07. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P. 244–248., (ISBN 978–5–7782–0752–3, IEEE Catalog Number 07EX1510). <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-39049102559&partnerID=40&md5=8a07f625ebd562051673aa176819a77c> document type: Conference Paper SOURCE: Scopus.

16. **Абраменко, Д. С.** Создание новой системы непрерывного контроля выходных параметров ультразвуковых аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.С. Абраменко // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: межвузовский сборник – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С.275–279.

17. **Abramenko, D. S.** Measuring instrument of parameters of ultrasonic vibrating systems / R.V. Barsukov, D.S. Abramenko, E.V. Ilchenko // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010. – Novosibirsk:

NSTU, 2010. – P. 373–375., (ISBN 978–1–4244–6626–9, IEEE Catalog Number CFP10500–ART).

18. **Abramenko, D.S.** The method of oscillations amplitude measuring [Text] / I.V. Kazancev, A.N. Lebedev, D.S. Abramenko // 8th siberian russian workshop and Tutorial on electron devices and materials EDM '07. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P. 282–284., (ISBN 978–5–7782–0752–3, IEEE Catalog Number 07EX1510). <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-39049102056&partnerID=40&md5=bcd8dcf6bc605df11f4f92ecde414b88> document type: Conference Paper SOURCE: Scopus.

19. **Abramenko, D.S.** Automation of the amplitude measurement process of ultrasonic oscillatory systems irradiating surface [Text] / G.V. Leonov, V.N. Khmelev, I.I. Savin, D.S. Abramenko // 6th Annual. 2005 International Siberian Workshop and Tutorials on electron devices and materials: Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2005. – P. 64–67., (ISBN 5–7782–0491–4, IEEE Catalog Number 07EX1510).

20. **Абраменко, Д. С.** Способ измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, И.И. Савин // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. – Бийск: АлтГТУ, 2004. – С. 230–235.

Подписано в печать 17.12.2010 г. Печать – ризография. Заказ № 2010-169

Объем 1,4 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИИО БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27